干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.01.06

疏勒河流域泥沙分布规律及水沙关系研究①

严宇红[1]， 黄维东[2,3]， 吴锦奎[4,5]， 黄晨璐[6]

（1 新疆维吾尔自治区水文局，新疆 乌鲁木齐 830001； 2 甘肃省水文水资源局，甘肃 兰州 730000； 3 甘肃农业大学，甘肃 兰州 730070； 4 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000； 5 中国科学院大学，北京 100049； 6 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127）

摘 要：泥沙是影响河流健康和水环境的重要因素之一，受气候变化和人类活动的影响，流域水文要素和下垫面条件发生了较大变化，尤其是实施大规模的水土保持措施后，部分河流的泥沙含量大幅减少，但在河西内陆河流域发源于祁连山西端的疏勒河流域，受降水条件和人类活动的影响，河流泥沙呈增加趋势。应用疏勒河流域实测长系列水文资料，采用水文统计法、差积曲线法、趋势检验法、突变检验法、非线性复相关模型法等方法，分析了流域泥沙时空分布规律及水沙关系，结果表明：疏勒河干流昌马堡站年输沙量为 333.5×10^4 t，至下游潘家庄站减少到 223.5×10^4 t；党河党城湾站年输沙量为 76.56×10^4 t，至下游沙枣园站增加到 121.3×10^4 t；疏勒河干流输沙量主要集中在汛期 7～8 月，占全年的 81.9%～84.0%，党河流域输沙量主要集中在 4～8 月，占全年的92.3%；流域泥沙变化总体呈增加趋势，突变点 1998 年以后，年输沙量增加了 86.3%～148.2%。建立了潘家庄站降水—泥沙、径流—泥沙以及年输沙量—年径流量—年最大洪峰流量关系模型，相关系数达到 0.717～0.858。流域出山口以上对泥沙的影响因素主要是降水，出山口以下主要是修建水库、水电站、引水工程、河道采砂等人类活动影响。随着国家对内陆河流域祁连山和河西走廊的日益关注，以及全国河长制的推行，河流生态健康已经提上日程，研究疏勒河流域泥沙分布规律及水沙关系，对国家实施西部生态安全战略、区域生态环境修复治理、水资源可持续利用等具有重要意义。

关 键 词： 泥沙；分布规律；趋势变化；水沙关系；疏勒河
文章编号： 1000-6060(2019)01-0047-09(0047～0055)

随着气候变化和人类活动的加剧，流域水文要素和下垫面条件发生了较大变化[1-3]。河流泥沙输移是河流中重要的水文现象，泥沙的多少主要与流域的气候、下垫面和人类活动等因素有关，其时空分布变化与流域内自然因素和人类活动的交互作用密切相关[4]。气候变化背景下，区域气温升高、蒸发量增大、降水量减少，致使河流的径流量和输沙量减小[5-7]；水利水电工程建设、水土保持、流域治理等频繁地人类活动，在解决人们生产生活用水、改善水土流失、促进生态环境建设的同时，也改变了水文要素的时空分布规律，特别是对河流泥沙分布及其演变规律影响更大[8-9]。

目前学术界对河流泥沙变化及水沙关系的研究大致可分为泥沙分布规律研究、水沙变化驱动力及其影响研究和水沙关系预报模型研究等。对泥沙分布规律的研究较多，崔亮等[10]应用数理统计方法分析了黑河流域东部子水系的径流量和输沙量年际变化特征，师长兴等[11]统计分析了黄河内蒙古段分期洪峰的水沙分布特征和洪峰水沙关系，徐立萍[12]探讨了吉林省各流域输沙模数的分布规律；在水沙变化驱动力及其影响研究方面，刘淑燕[13]等研究了黄土丘陵沟壑区典型小流域土地利用变化对径流输沙的影响，孙悦等[14]分析了 1975—2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应，晏清洪等[15]分析了降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响；水沙关系预报模型研究方面，李怀恩

① **收稿日期：**2018-06-24； **修订日期：**2018-09-12
基金项目：国家自然科学基金面上项目(41771084)；水利部公益性行业科研专项经费项目(201301083)
作者简介：严宇红(1969-)，女，陕西大荔人，高级工程师，硕士，主要从事水文水资源研究工作. E-mail:1554385505@qq.com
通讯作者：黄维东. E-mail:gsdxhwd@163.com

等[16]利用黑河黑峪口水文站的长系列泥沙和径流实测资料分别建立了年输沙量和次暴雨输沙量的水沙关系，郑明国等[17]研究拟合出黄土丘陵沟壑区较大洪水次暴雨径流深和产沙模数之间的关系模型。

由上可见，对水沙演变规律的研究较多，但应用水文站详细实测长系列资料，对河西内陆河流域疏勒河水系的泥沙演变规律及其关系模型的研究较少。疏勒河流域位于河西走廊西端，生态环境脆弱，河流来水主要为祁连山冰雪融水和降水补给，出山口以上流域植被良好，水土涵养条件好，出山口以下受修建水库、水电开发、引水工程、河道采砂等的影响，水量和泥沙呈现减少或增加趋势[18]。本文通过分析疏勒河流域泥沙时空分布规律，掌握泥沙的趋势变化和突变点，进而分析河流泥沙的演变规律，建立雨水沙关系模型，分析影响泥沙变化的主要因素。研究区域气候变化和人类活动影响下的河流泥沙分布规律，对国家实施西部生态安全战略、区域生态环境修复治理、水资源可持续利用等具有重要意义。

1 流域概况

疏勒河流域位于河西内陆河流域西端，地理位置处于92°11′~98°30′E，38°00′~42°48′ N，流域面积12.923 2×10^4 km^2。疏勒河干流发源于祁连山脉的岗格尔肖合力岭，干流全长945 km，从河源到昌马峡出山口长347 km，流经肃北县、玉门市、瓜州县、敦煌市，最终消失在沙漠中。干流在昌马峡以上称昌马河，昌马峡以下始称疏勒河，另外还分布有小昌马河、石油河—赤金河、白杨河、踏实河—榆林河、党河等5条河流，其中党河流域面积较大，其他河流均较小。党河是疏勒河的最大支流，自修建党河水库以后，地表水基本与疏勒河干流失去联系，只有部分地下水径流到下游进入疏勒河干流。疏勒河流域水系分布见图1。

流域内南部祁连山区海拔高程2 000~5 500 m，北部马鬃山区及山前戈壁平原区海拔高程在2 000 m以下。流域远离海洋，水汽不易输送，降水少，蒸发大，日照时间长，四季多风，冬季寒冷，昼夜温差大，属典型的大陆性气候。南部祁连山区多年平均降水量由东南部的170 mm左右向西北递减至70 mm左右，祁连山山前区年降水量为50~100 mm，走廊区降水量仅为30~65 mm。水面蒸发量从高山区的1 000 mm左右增加到走廊平原区的2 000 mm以上。气温随海拔的变化也非常明显，祁连山高山区在零度以下，山前区年平均气温在5 ℃左右，

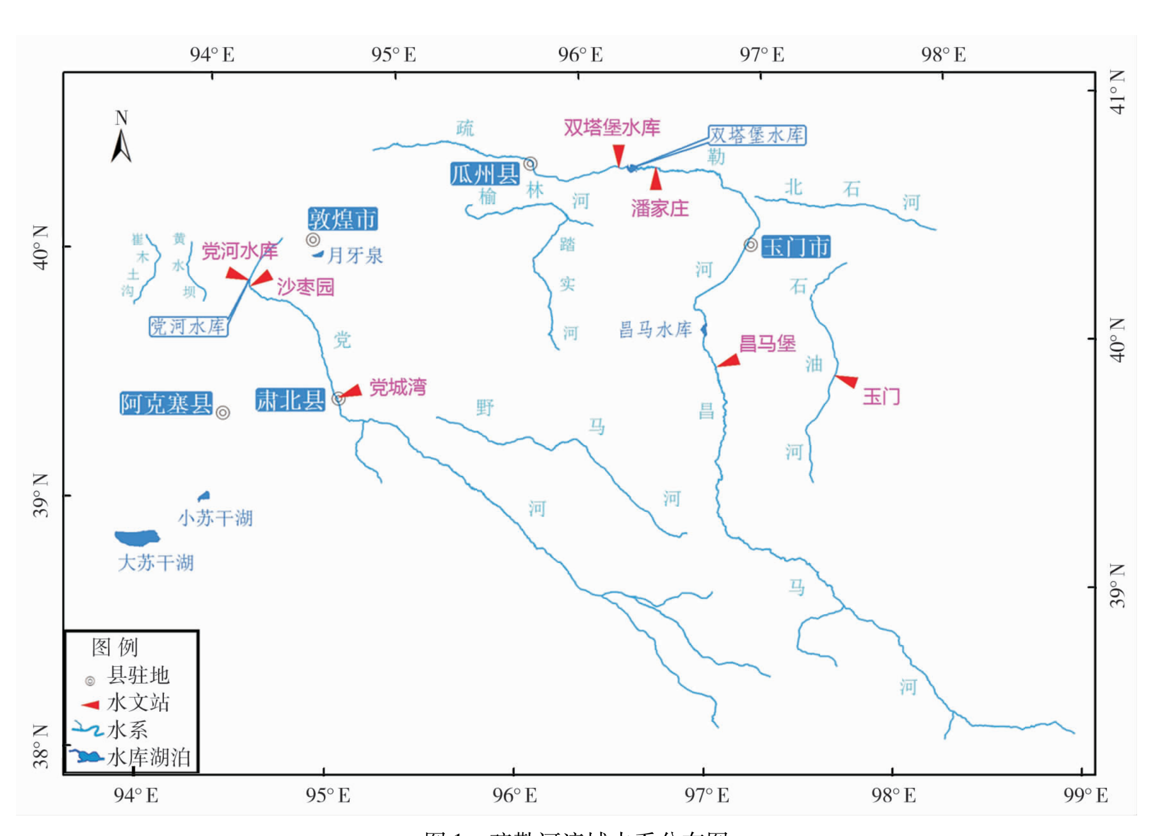


图1 疏勒河流域水系分布图

Fig. 1 River system of the Shule River basin

平原低海拔地区年平均气温在6.5~9.0 ℃。

疏勒河流域内共修建水库82座,总库容7.327×10^8 m^3,其中大型水库3座,总库容4.988 0×10^8 m^3,中型水库3座,总库容1.241 8×10^8 m^3,小型水库76座,总库容1.097 4×10^8 m^3;修建水电站66座;有塘坝30处,总容积0.033 29×10^8 m^3,窖池1 893处,总容积2.260 0×10^4 m^3;水土流失治理面积12.879×10^4 hm^2,其中乔木、灌木等水土保持林666.7 hm^2,经济林6.7 hm^2,种草20.0 hm^2,封禁治理12.78×10^4 hm^2,其他治理280.0 hm^2。

2 资料来源及分析方法

本次分析重点选取疏勒河流域的昌马堡、潘家庄、党城湾、沙枣园等4处水文站建站至2012年实测水文资料,数据资料均为水文部门实测,水文站均为国家基本水文站,资料观测和整编严格执行国家有关水文测验、整编规范,资料系列较长,数据真实可靠,具有一定的可靠性、一致性、代表性,资料精度满足分析要求。

河流泥沙年际变化应用多年特征值、历年过程线、差积曲线等方法来分析;水沙的年内分配主要采用年内分配百分比、年内分配过程线等方法来分析;趋势分析采用坎德尔秩次相关、斯波曼秩次相关、线性趋势相关等方法分析;突变分析采用Man-Kendall法、有序聚类法、Lee-Heghinan法等方法分析;雨水沙关系采用线性相关和非线性复相关关系模型分析。

3 泥沙时空分布规律

3.1 空间分布

疏勒河流域主要代表站的水文特征值见表1。干流泥沙主要来自出山口以上,出山口以下由于水量被大量引用,泥沙也随之在渠道和农田淤积,下游河道径流量和输沙量骤减,至双塔堡水库水量全部拦蓄,泥沙大部分淤积,昌马堡站年输沙量为333.5×10^4 t,至下游潘家庄站减少到223.5×10^4 t。党河出山口党城湾站年输沙量为76.56×10^4 t,党城湾至下游沙枣园区间,河道水量下渗和蒸发损失较大,敦煌月牙泉的水量补给来源就在此区间,所以沙枣园站径流量减少,但由于该区间植被较差,水土流失严重,沙枣园站年输沙量增加至121.3×10^4 t。1976年在沙枣园修建党河水库后,水量全部拦蓄,泥沙大部分淤积。疏勒河干流和党河的年平均含沙量均表现为上游小、下游大,下游是上游的2倍左右,主要是出山口以下植被条件差、人类活动频繁所致。与党河流域相比,疏勒河干流的年降水量相对少,植被等下垫面条件没有党河流域好,水土流失相对严重,疏勒河干流的年平均含沙量、年输沙模数均大于党河。

3.2 年际变化

分别绘制代表站水文要素历年过程线(图2),3个代表站历年降水量、径流量、输沙量、含沙量均呈增大趋势,其中降水量、输沙量增加趋势基本一致,径流量昌马堡站增加趋势显著,党城湾站次之,潘家庄站增加不明显,主要是疏勒河干流出山口以下经济社会用水消耗河道水量较多。昌马堡站年平均含沙量呈微弱增加趋势,潘家庄、党城湾站年平均含沙量增加趋势显著。绘制历年输沙量、含沙量差积曲线(图3),可以看出,疏勒河干流20世纪80年代以前输沙量、含沙量呈递减趋势,其后出现短暂的突变增长,80年代至90年代末又呈递减趋势,90年代末以来则呈增长趋势。党河流域输沙量、含沙量变化相对较小,90年代末以来略有增长趋势[19]。

3.3 年内变化

分别绘制昌马堡、潘家庄、党城湾站多年平均月降水量、平均流量、平均输沙率年内分配过程线(图4)。降水量主要集中在4~9月,占全年的76.5%~

表1 疏勒河流域代表站水文特征值表

Tab.1 Hydrological eigenvalue of represent stations in the Shule River basin

河名	站名	集水面积 / km^2	设站年份	年径流量 / 10^8 m^3	年输沙量 / 10^4 t	年平均含沙量 / $kg \cdot m^{-3}$	年输沙模数 / $t \cdot km^{-2}$
昌马河	昌马堡	10 961	1944年4月	9.590	333.50	3.478	304.30
疏勒河	潘家庄	18 496	1958年3月	2.715	223.50	8.232	120.80
党河	党城湾	14 325	1965年8月	3.570	76.56	2.145	53.45
党河	沙枣园	16 958	1955－1975年	2.905	121.30	4.176	71.53

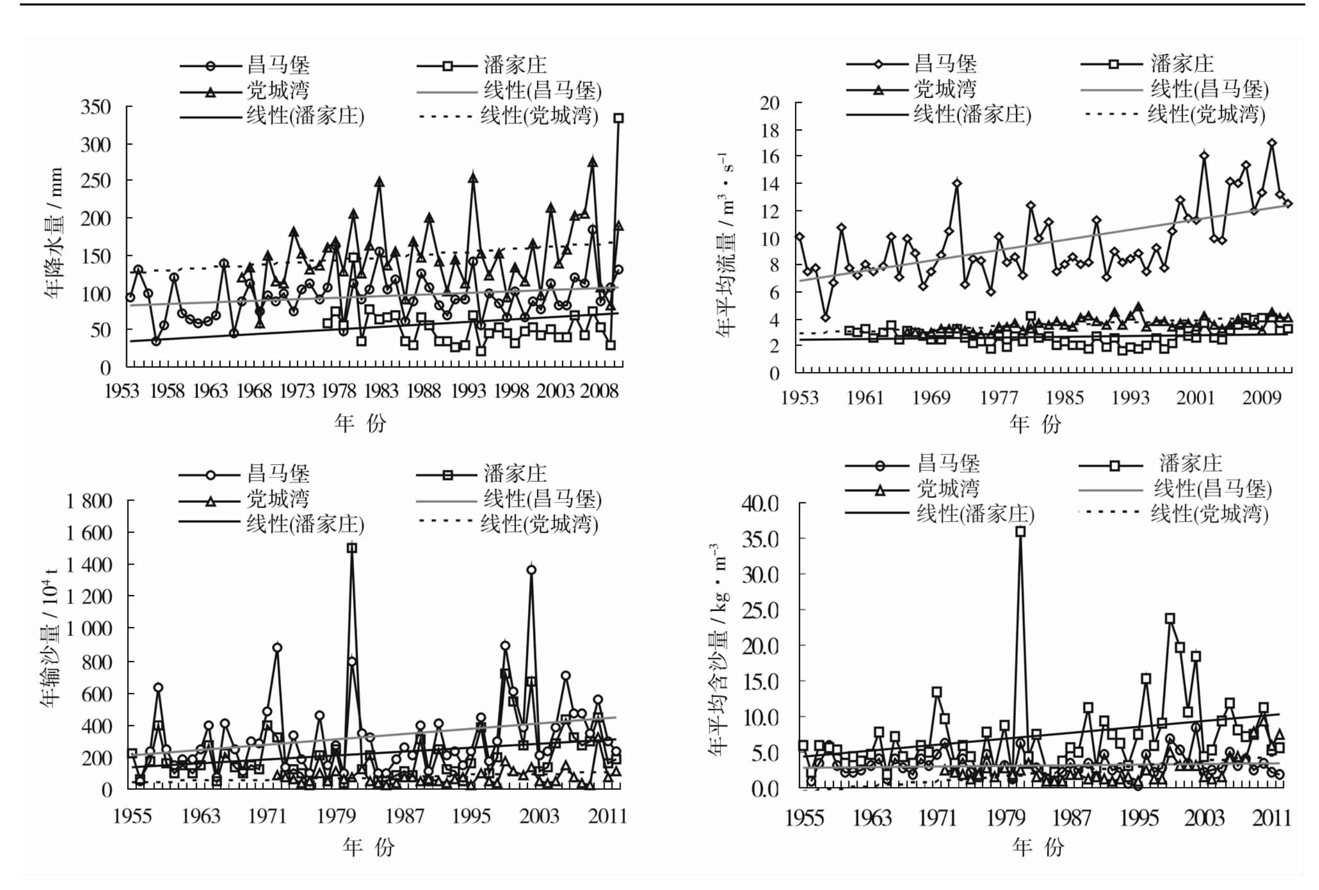


图 2　疏勒河流域代表站水文要素历年过程线图

Fig. 2　Multi-year hydrological diagram of represent stations in the Shule River basin

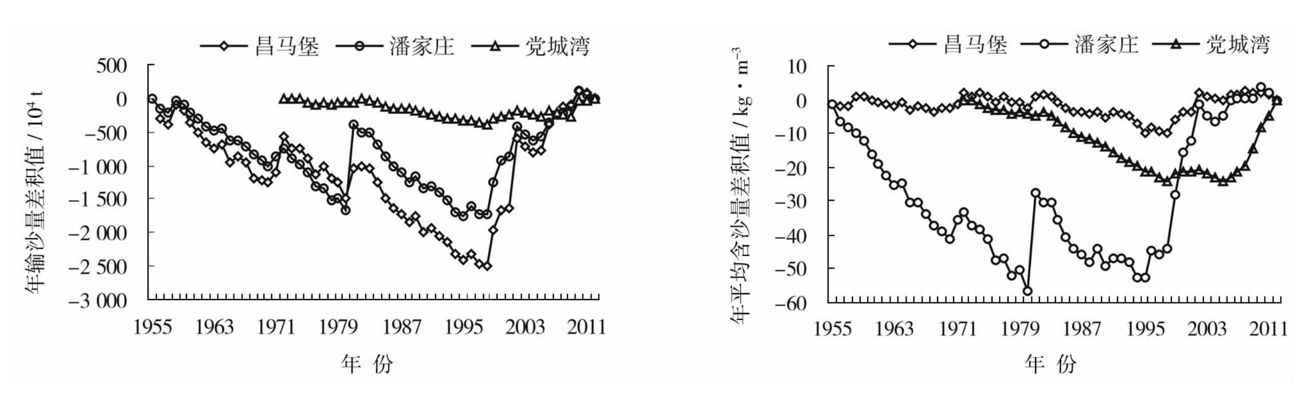


图 3　疏勒河流域代表站历年输沙量、含沙量差积曲线图

Fig. 3　Residual mass curve of multi-year sediment discharge and average sediment concentration of represent stations in the Shule River basin

86.1%；径流年内分配 3 个站不一致，昌马堡站主要集中在 5～9 月，占全年的 75.3%，潘家庄站主要集中在 3～9 月，占全年的 71.8%，党城湾站主要集中在 3～10 月，占全年的 78.8%，潘家庄和党城湾站受气温升高产生冰雪融水补给和地下水补给影响较大，径流集中时段提前至 3 月份；输沙量更为集中，干流昌马堡、潘家庄站主要集中在 7～8 月两个月，分别占全年的 81.9%、84.0%，党河党城湾站相对均匀，主要集中在 4～8 月，占全年的 92.3%。

4　泥沙演变规律

4.1　趋势分析

采用坎德尔秩次相关、斯波曼秩次相关、线性趋势相关等 3 种方法，对各代表站历年输沙量进行趋势检验统计分析，综合判断趋势变化情况，结果见表 2。流域泥沙变化均呈增加趋势，其中昌马堡、潘家庄站输沙量呈显著增加趋势，党城湾站呈不显著增加趋势[20]。

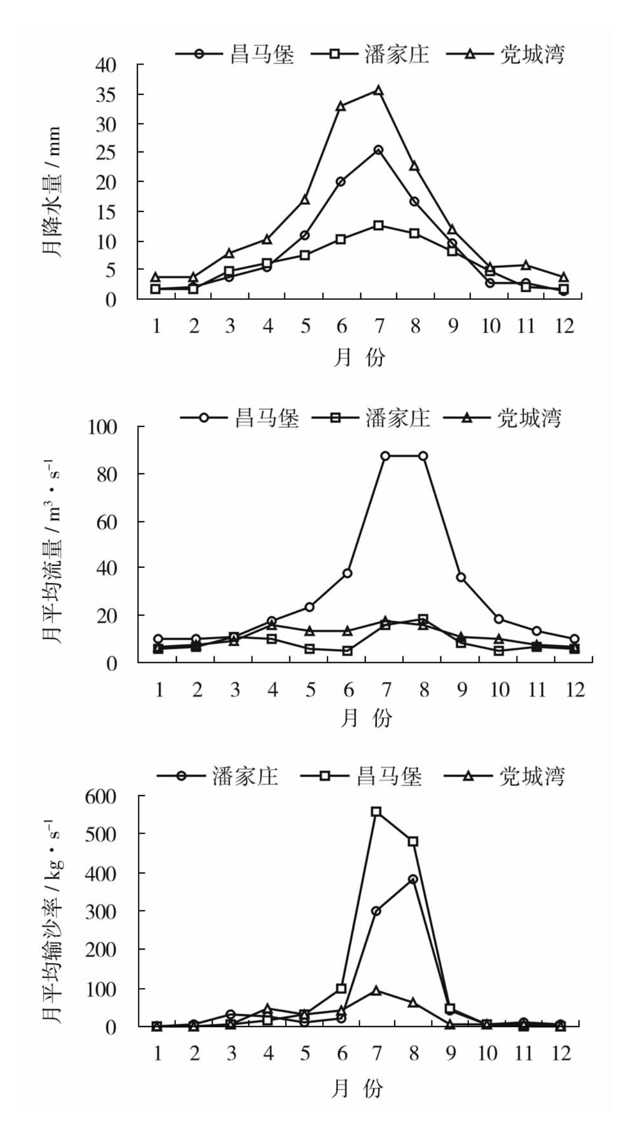


图 4 疏勒河流域代表站多年平均月降水量、径流量、输沙率年内分配过程线图

Fig. 4 Average monthly precipitation, runoff and sediment discharge of represent stations of multi-year allocation process diagram in the Shule River basin

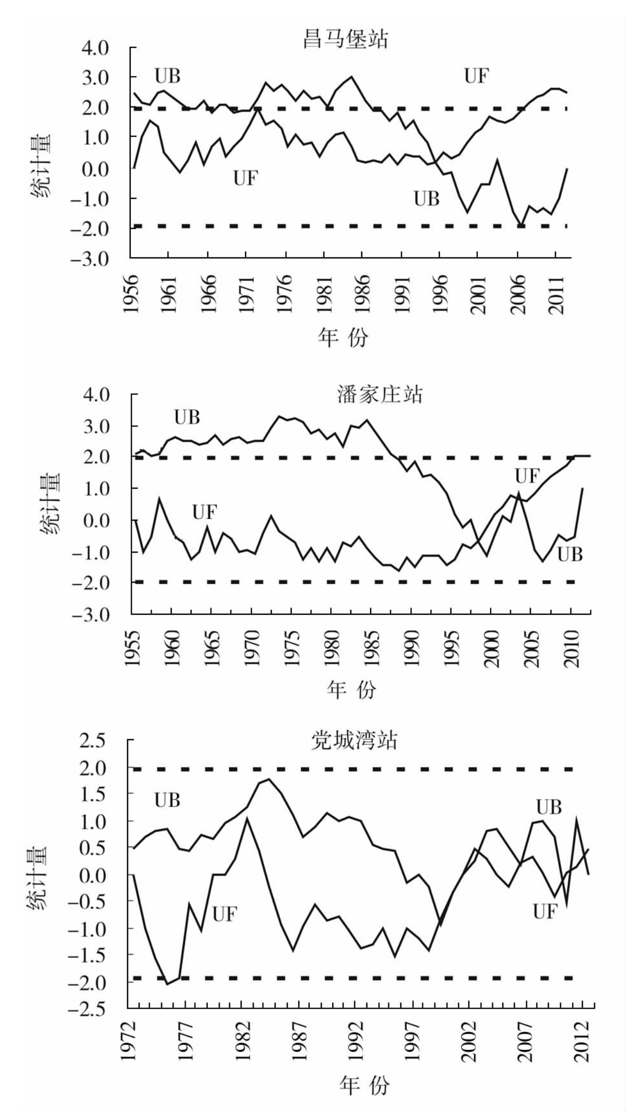


图 5 疏勒河流域代表站年输沙量 Man-Kendall 统计曲线

Fig. 5 M-K statistical curve of annual sediment discharge of represent stations in the Shule River basin

4.2 突变分析

采用 Man-Kendall 法、有序聚类法、Lee-Heghinan 法等方法对代表站进行输沙量突变分析,同时以突变点为界,分别计算突变前后的均值及跳跃量(表 3)。结果表明,昌马堡、潘家庄、党城湾站输沙量均发生显著突变,突变点均为 1998 年。代表站 Man-Kendall 统计曲线见图 5,进一步印证了发生突变的事实。

4.3 泥沙影响因素分析

降水变化和水土保持等人类活动是导致水沙量变化的根本和直接原因[21]。疏勒河流域出山口以上对泥沙的影响因素主要是降水,出山口以下主要受修建水库、水电站、引水工程、河道采砂等人类活动影响。分析突变点 1998 年前后的降水量、径流量、最大洪峰流量、输沙量(表 4),3 个代表站年降水量增加了 11.9% ~37.7%,年径流量增加了 6.5% ~52.9%,年输沙量增加了 86.3% ~148.2%。泥沙增加比例远大于降水和径流,主要是 1998 年以后降水量增加而且相对集中,每年形成的最大洪水对全年输沙量的贡献较大,这从 3 个站突变点前后的最大洪峰流量均值反映出来,1998 年以后昌马堡、潘家庄、党城湾站最大洪峰流量分别增加了 39.8%、24.9%、39.2%,致使后期河流泥沙增加较多。党河流域与疏勒河干流 1998 年前后的年降水量变化基本一致,党河流域径流量增加比例小于疏勒河干流,

表 2 疏勒河流域代表站输沙量趋势分析表

Tab. 2 Trend analysis of sediment discharge of represent stations in the Shule River basin

站名	趋势方程	趋势项检验方法($\alpha=0.05$)						趋势程度
		坎德尔秩次相关法		斯波曼秩次相关法		线性趋势相关法		
		$U(\alpha/2)=1.96$	是否显著	$T(\alpha/2)=2.01$	是否显著	$T(\alpha/2)=2.01$	是否显著	
昌马堡	$Y=4.0353X+216.51$	2.451	显著	2.40	显著	2.17	显著	增加
潘家庄	$Y=2.8555X+137.86$	2.018	显著	2.25	显著	1.62	不显著	增加
党城湾	$Y=1.1733X+51.92$	0.451	不显著	0.55	不显著	1.71	不显著	增加

表 3 疏勒河流域代表站年输沙量突变分析表

Tab. 3 Saltation analysis of annual sediment discharges of represent stations in the Shule River basin

站名	均值跳跃性分析($\alpha=0.05$)						
	检验结果 $T(\alpha/2)=2.01$	跳跃显著性	跳跃点	跳跃前均值	跳跃后均值	跳跃量	跳跃趋势
昌马堡	3.46	显著	1998 年	275.20	512.71	237.52	增加
潘家庄	2.40	显著	1998 年	184.11	347.43	163.32	增加
党城湾	3.30	显著	1998 年	69.07	171.40	102.33	增加

表 4 疏勒河流域代表站 1998 年前后雨水沙对照表

Tab. 4 Rain-runoff-sand contrast table of represent stations in the Shule River basin before and after 1998

水文要素	昌马堡站			潘家庄站			党城湾站		
	1953—1998 年	1999—2012 年	变化量 / %	1959—1998 年	1999—2012 年	变化量 / %	1966—1998 年	1999—2012 年	变化量 / %
年降水量 / mm	92.4	104.2	12.8	53.3	73.4	37.7	145.3	162.6	11.9
年径流量 / 10^8 m^3	8.540	13.06	52.9	2.511	3.297	31.3	3.502	3.729	6.5
年最大洪峰流量 / $m^3\cdot s^{-1}$	269	376	39.8	89.7	112	24.9	77.6	108	39.2
年输沙量 / 10^4t	275.2	512.7	86.3	184.1	347.4	88.7	69.07	171.4	148.2
年平均含沙量 / $kg\cdot m^{-3}$	3.22	3.93	21.8	7.33	10.54	43.7	1.97	4.60	133.0

但输沙量增加比例是疏勒河干流的 1.7 倍，根据调查分析，党河上游目前修建有水电站 8 座，其中 20 世纪 90 年代以后新修建 6 座，加上河道采砂、乱采乱挖现象严重，人类活动对河流的扰动持续增强，致使河流泥沙含量增大。

5 水沙关系模型

5.1 降水—泥沙关系模型

降水—泥沙关系模型公式可表示为：

$$W_S = K \times P^a \quad (1)$$

式中：W_S 是年输沙量，10^4 t；P 是年降水量，mm；K 是产沙水平系数；a 是降水变化对流域产沙量的影响指数。

以潘家庄站 1976—2012 年实测泥沙资料和流域面平均降水量进行分析计算，拟合模型公式结果如下：

$$W_S = 18.7111 \times P^{0.562} \quad (2)$$

降水—泥沙相关关系较好，相关系数达到 0.806。

5.2 径流—泥沙关系模型

径流—泥沙关系模型公式可表示为：

$$W_S = A \times W^n \quad (3)$$

式中：W_S 为年输沙量，10^4 t；W 为年径流量，10^4 m^3；A 为系数，反映输沙水平；n 为指数，反映径流变化对输沙量的影响。

以潘家庄站 1959—2012 年实测径流和泥沙资料拟合模型公式结果如下：

$$W_S = 0.3665 \times 10^{-8} \times W^{2.4061} \quad (4)$$

径流—泥沙相关系数为 0.717,小于降水—泥沙相关系数,主要是下游径流一部分来源于泉水溢出补给,泥沙主要产生于上游较大洪水,径流与泥沙异源不同步所致。

每年最大洪水对年输沙量的影响较大,以年最大洪峰流量 Q_m 为参数,输沙量与径流量的关系式可表达如下:

$$W_S = a_0 \times W^{\alpha} \times Q_m{}^{\beta} \quad (5)$$

其中:a_0、α、β 为待定系数。

以潘家庄站 1959—2012 年实测年输沙量、径流量、最大洪峰流量数据拟合公式如下:

$$W_S = 87.186 \times 10^{-8} \times W^{1.5327} \times Q_m{}^{0.7819} \quad (6)$$

拟合公式相关系数为 0.858,相关关系均好于降水—泥沙、径流—泥沙关系,实测值与模拟值对照见图 6,公式模拟值与实测值接近,误差较小。

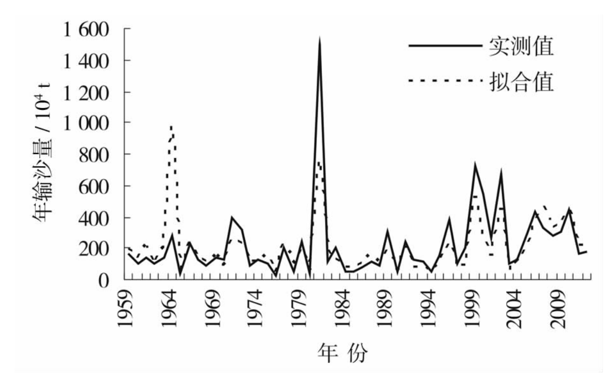


图 6 疏勒河流域代表站年输沙量模拟值与实测值对照图

Fig. 6 Simulation values and the measured values contrast diagram of the annual sediment discharge of represent stations in the Shule River basin

6 结 论

以前对疏勒河流域出山口以上水文要素变化的关注和研究较多,本文应用疏勒河流域实测长系列水文资料,采用水文统计法、差积曲线法、趋势检验法、突变检验法、非线性复相关模型法等方法,系统分析了疏勒河干流上下游及其主要支流党河的泥沙时空分布规律及水沙关系,主要结论如下:

(1) 在空间分布上,疏勒河干流的泥沙主要来自出山口以上,出山口以下由于水量被大量引用,下游河道径流量和输沙量急剧减少,昌马堡站年输沙量为 333.5×10^4 t,至下游潘家庄站减少到 223.5×10^4 t;党河党城湾站年输沙量为 76.56×10^4 t,由于区间植被较差,水土流失严重,至下游沙枣园站年输沙量增加至 121.3×10^4 t。流域下游的年平均含沙量是上游的 2 倍左右,疏勒河干流的年平均含沙量、年输沙模数均大于党河,主要是上下游植被条件、人类活动的差异性所致。

(2) 在时程分布上,疏勒河流域泥沙历年变化呈增加趋势,昌马堡、潘家庄、党城湾站年输沙量均发生显著突变,突变点均为 1998 年,突变点前后的年输沙量增加了 86.3% ~148.2%。干流昌马堡、潘家庄站输沙量主要集中在 7 月和 8 月,分别占全年的 81.9%、84.0%,党河党城湾站主要集中在 4 ~ 8 月,占全年的 92.3%。

(3) 建立了疏勒河干流下游控制站潘家庄站降水—泥沙、径流—泥沙、年输沙量—年径流量—年最大洪峰流量相关关系,结果表明,年最大洪水对输沙量的影响很大,应通过水库工程重点做好大洪水的调水调沙任务。

(4) 疏勒河流域出山口以上来水来沙的影响因素主要是降水,应重点加大上游区的水土涵养力度,实施禁垦、禁采、禁牧,防止过度开发,减少水土流失。出山口以下的水沙主要受修建水库、水电站、引水工程、河道采砂等人类活动的影响,下游河道水量锐减或断流,戈壁荒漠化严重,生态环境恶化,应适当向中下游增加生态用水,改善生态环境。

(5) 祁连山是我国西部重要生态安全屏障,结合当前全国推行的河长制和祁连山国家公园体制试点,突出生态系统整体保护和系统修复,重点加强流域综合治理,保障河流健康和水资源可持续利用。可以借鉴在疏勒河流域西土沟洪水资源利用模式,将高含沙洪水截引至荒漠戈壁,既增加了地下水补给量,又在地面形成板结层,起到固沙、改善植被条件和减少河道泥沙的作用。

参考文献(References)

[1] 柳葳,许有鹏,黄云. 气候变暖对新疆降水和径流影响分析[J]. 干旱区地理,2005,28(5):597 -602. [LIU Wei,XU Youpeng,HUANG Yun. Effects of global warming on precipitation and runoff volume in Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2005,28(5):597 -602.]

[2] 徐宗学,张玲,阮本清. 北京地区降水量时空分布规律分析[J]. 干旱区地理,2006,29(2):186 -192. [XU Zongxue,ZANG Ling,RUAN Benqing. Analysis on the spatiotemporal distribution

of precipitation in the Beijing Region[J]. Arid Land Geography, 2006,29(2):186－192.]

[3] 牛最荣,高前兆,扈祥来,等. 甘肃时段暴雨主要统计参数的水平分布规律研究[J]. 干旱区地理,2004,27(3):310－314.[NIU Zuirong, GAO Qianzhao, HU Xianglai, et al. Study on the horizontal distribution of the main statistical parameters of rainstorms in Gansu Province in 5 durations[J]. Arid Land Geography,2004,27(3):310－314.]

[4] 姚章民. 珠江流域主要河流泥沙变化分析[J]. 水文,2013,33(4):80－83.[YAO Zhangmin. Major rivers in the Pearl River Basin sediment change analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2013,33(4):80－83.]

[5] 牛赟,刘贤德,敬文茂,等. 祁连山大野口流域气温、降水、河川径流特征分析[J]. 干旱区地理,2014,37(5):931－938.[NIU Yun, LIU Xiande, JING Wenmao, et al. Feature analysis of temperature and precipitation and river runoff at Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography,2014,37(5):931－938.]

[6] 牛最荣,赵文智,刘进琪,等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. 冰川冻土,2012,32(2): 73－83.[NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, LIU Jinqi, et al. Study on change characteristics and tendency of temperature, precipitation and runoff in Weihe River Basin in Gansu[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,32(2): 73－83.]

[7] 李常斌,王帅兵,杨林山,等. 1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1259－1266.[LI Changbin, WANG Shuaibing, YANG Linshan, et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe River Basin from 1951 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1259－1266.]

[8] 史红玲,胡春宏,王延贵,等. 黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J]. 人民黄河,2014,36(4):1－5.[SHI Hongling, HU Chunhong, WANG Yangui, et al. Analysis on variation trends of runoff and sediment of the Yellow River Basin and reasons discussion[J]. Yellow River,2014,36(4):1－5.]

[9] 常继青,牛最荣. 甘肃黄河流域与疏勒河流域降水径流变化特性对比分析[J]. 水文,2014,34(5):94－96.[CHANG Jiqing, NIU Zuirong. The Yellow River Basin in Gansu Province and characteristic analysis of Shule River Basin rainfall runoff change[J]. Journal of China Hydrology,2014,34(5):94－96.]

[10] 崔亮,陈学林,安冬,等. 60 年来黑河流域东部子水系中上游径流量、输沙量变化特征分析[J]. 水文,2015,35(1):82－87.[CUI Liang, CHEN Xuelin, AN Dong, et al. Change characteristics of runoff and sediment runoff in upper and middle reaches of eastern Heihe River Basin in 60 years[J]. Hydrology,2015,35(1): 82－87.]

[11] 师长兴,邵文伟,范小黎,等. 黄河内蒙古段洪峰特征及水沙关系变化[J]. 地理科学进展,2012,31(9):1124－1132.[SHI Changxing, SHAO Wenwei, FAN Xiaoli, et al. A study on characteristics and sediment rating curves of floods in the Inner Mongolian reach of the Yellow River[J]. Progress in Geography,2012,31(9):1124－1132.]

[12] 徐立萍. 吉林省河流泥沙分布规律分析[J]. 东北水利水电,2015,(2):29－30.[XU Liping. Analysis of rivers sediment distribution law in Jilin Province[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast,2015,(2):29－30.]

[13] 刘淑燕,余新晓,信忠保,等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用变化对水沙关系的影响[J]. 地理科学进展,2010,29(5):565－571.[LIU Shuyan, YU Xinxiao, XIN Zhongbao, et al. Effects of land use change on runoff-sediment relationship at watershed in the loess hilly region[J]. Progress in Geography,2010,29(5):565－571.]

[14] 孙悦,李栋梁. 1975—2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J]. 冰川冻土,2014,36(2):413－423.[SUN Yue, LI Dongliang. Features and response to climate-driven factors of the runoff in the upper reaches of the Weihe River during 1975－2011[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(2):413－423.]

[15] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响[J]. 中国水土保持科学,2013,11(4):9－16.[YAN Qinghong, YUAN Cuiping, LEI Tingwu, et al. Effects of precipitation and erosion control practices on the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of typical watersheds in the hilly-gully region on the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation,2013,11(4):9－16.]

[16] 李怀恩,沈冰,樊尔兰. 黑河流域水沙关系模型及其应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):62－65.[LI Huai'en, SHEN Bing, FAN Erlan. Relationship between sediment and runoff in Heihe Basin and its application[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation,1999,5(4):62－65.]

[17] 郑明国,蔡强国,程琴娟. 一种新的流域水沙关系模型及其在年际时间尺度的应用[J]. 地理研究,2007,26(4):745－754.[ZHENG Mingguo, CAI Qiangguo, CHENG Qinjuan. One new sediment yield model for single storm events and its application at annual time scale[J]. Geographical Research,2007,26(4):745－754.]

[18] 李计生,胡兴林,黄维东,等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测[J]. 冰川冻土,2015,37(3):803－810.[LI Jisheng, HU Xinglin, HUANG Weidong, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River Basin, Hexi Corridor[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(3):803－810.]

[19] 师光玉,赵红. 陕西省黄河流域泥沙流失变化分析[J]. 水文,2006,26(2):91－94.[SHI Guangyu, ZHAO Hong. The Yellow River silt erosion in Shaanxi change analysis[J]. Journal of China Hydrology,2006,26(2):91－94.]

[20] 王毓森. 水文时间序列趋势与突变分析系统开发与应用[J]. 甘肃科技,2016,32(9):36－37.[WANG Yusen. Hydrological time series trend and mutation analysis system development and application[J]. Journal of Gansu Science and Technology,2016,32(9):36－37.]

[21] 王毓森,黄维东,崔亮,等. 黑河流域东部子水系近 60 年来泥沙演变规律分析[J]. 甘肃水利水电技术,2016,52(1):5－8.[WANG Yusen, HUANG Weidong, CUI Liang, et al. About 60 years in Heihe River Basin in eastern sub-drainage sediment evolution law analysis[J]. Journal of Water Resources and Hydropower Technology in Gansu Province,2016,52(1):5－8.]

Sediment distribution and runoff-sediment relationship in the Shule River Basin

YAN Yu-hong[1], HUANG Wei-dong[2,3], WU Jin-kui[4,5], HUANG Chen-lu[6]

(1 *Hydrology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region*, *Urumqi* 830001, *Xinjiang*, *China*; 2 *Hydrology and Water Resources Bureau of Gansu Province*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*; 3 *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*; 4 *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*; 5 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 1000495, *China*; 6 *College of Urban and Environmental Science*, *Northwest University*, *Xi'an* 710127, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: The river basin hydrological factors and underlying surface conditions which were affected by the climate change and human activities have been changed greatly. The sediment concentration was decreased significantly after the implementation of large-scale soil and water conservation measures in some parts of rivers. However, the river sediment presented a trend of increasing in the Shule River basin which is originated in the western Qilian Mountains in the Hexi Inland River Basin, Gansu Province, China due to precipitation and human activities. The time-space distribution law of the sediment and the relationship between the sediment and the water sand were analyzed systematically by using the data from four hydrological stations which include Changmabu, Panjiazhuang, Dangchengwan, and ShaZaoyuan in Shule River Basin during the time period from the establishment of the hydrometric stations to 2012. The spatiotemporal distribution law of river sediment was analyzed using hydrologic statistics. The annual sediment discharge of the main stream of the Shule River at Changmabu station is 333.5×10^4 t · a^{-1} and it is then reduced to 223.5×10^4 t · a^{-1} at Panjiazhuang station in the downstream. The annual sediment discharge of the Danghe River is 76.56×10^4 t · a^{-1} at Dangchengwan station and it was then increased to 121.3×10^4 t · a^{-1} at Shazaoyuan station in the downstream. The sediment discharge mainly happened in the flood season from July to August in the main stream of Shule River, which accounted for 81.9% – 84.0% of its annual sediment discharge. The sediment discharge of the Danghe basin mainly happened from April to August, which accounted for 92.3% of its annual sediment discharge. The sediment change trend was analyzed using Kandel rank correlation, Berman rank correlation and linear trend correlation. The sediment mutation is analyzed by the Man-Kendall method, order clustering method, Lee-Heghinan method. The results show that the change of sediment in the basin indicated an increasing trend and annual sediment charge was increased by 86.3% – 148.2% after the mutation point in 1998. At the Panjiazhuang station, the relation model between precipitation and sediment, the relation model between runoff and sediment, and the relation model among annual sediment discharge, annual runoff, and annual maximum peak flow were established by using the method of linear correlation and nonlinear complex correlation and the result showed high correlation coefficients ranging from 0.717 to 0.858. Above the valley outlet, the precipitation is the main factor for the coming water and sediment. In order to reduce the soil erosion, the relevant authorities or departments should take actions to increase the soil and water conservation in the upstream areas, by implementing the ban on reclamation, mining and grazing, and preventing over-exploitation. Below the valley outlet, the water sediment is mainly influenced by human activities such as building reservoirs, constructing hydropower station, as well as water diversion engineering project and sand excavation in river courses. The water quantity in the downstream reaches is sharply reduced or depleted. The desertification of the Gobi Desert is serious and the ecological environment is deteriorated. The ecological water quantity should be appropriately increased in the middle and lower reaches in order to improve the ecological environment. With the increasing attention to the Qilian Mountain and the Hexi Corridor in the inland river basin, the choice of the Qilian Mountain as the national park system pilot and the implementation of the national river chief system, the river ecosystem health has been on the agenda. It has significance to study the watershed sediment distribution laws and water sediment relations to help execute the strategy of the western ecological security, and restore the regional ecological environment, and sustainably utilize water resources.

Key words: sediment; distribution law; trend variation; runoff-sediment relationship; Shule River